

고창 무장현 관아와 읍성 출토 비격진천뢰의 제작기법과 보존처리

Manufacturing Technique and
Conservation of Bigyeokjincheollae Bomb
Shells Excavated from the Ancient Local
Government Office and Fortress of
Mujang-hyeon, Gochang

김해솔*, 허일권
국립진주박물관 학예연구실

Kim Haesol*, Huh Ilkwon
Curatorial Affairs Office, Jinju National
Museum

요약

본 연구는 2018년 고창 무장현 관아와 읍성에서 발굴된 비격진천뢰 11점의 보존처리 과정과, 컴퓨터단층촬영(CT)과 감마선(γ -ray)투과조사·금속 조직 분석을 통한 제작기법을 수록하였다. 보존처리는 2019년 국립진주박물관에서 진행된 특별전 ‘비격진천뢰’(07.16.~08.25.) 전시를 위한 1차 보존처리 과정인 이물질제거와 강화처리를 진행 하였고, 이 과정에서 비격진천뢰 뚜껑(개철, 蓋鐵)을 최초로 확인 할 수 있었다. 제작기법의 경우 11점의 CT와 γ -ray촬영 결과 본체 내부에 많은 기공과 측면에 형틀받침쇠(chaplet, 掣持)가 사용되었음을 확인하였으며, 기벽의 두께는 위아래에 비해 측면이 비교적 얇게 설계되었다. 또한 아래 부분 중앙에 쇳물주입구 흔적이 관찰되어 본체를 뒤집은 상태에서 쇳물이 주입되었음을 확인하였다. 금속 조직 분석은 본체 2점과 뚜껑 1점의 분석을 실시하였다. 분석 결과 본체는 시멘타이트(cementite)조직과 펄라이트(pearlite)조직이 관찰되어 주조로 만들어졌고, 뚜껑은 페라이트(ferrite) 조직에 일부 펄라이트가 끼어있으며 비금속 개재물이 일직선으로 관찰되어 단조로 만들었다는 것을 확인하였다.

주제어 : 비격진천뢰, 컴퓨터단층촬영(CT), 감마선(γ -ray)투과조사, 금속 조직 분석

Abstract

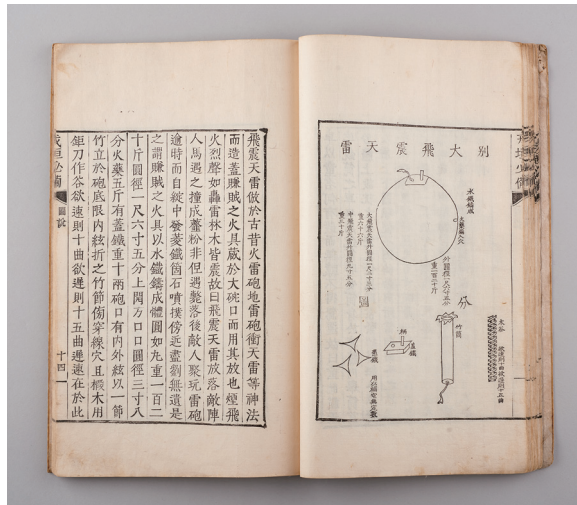
This paper describes the consevation treatment of eleven bigyeokjincheollae bomb shells that were excavated from the Joseon-period local government office and fortress of Mujang-hyeon (present-day Mujang-myeon) in Gochang in 2018. It also provides information on the production method of the shells revealed through CT scanning, gamma-ray transmission imaging, and metallographic analysis. In preparation for the special exhibition “Bigyeokjincheollae” at the Jinju National Museum in 2019 (July 16 to August 25), contaminants were removed from the shells and their surface was reinforced during the first phase of conservation treatment. Furthermore, the closures for the shells were identified for the first time. Regarding the production of the shells, the CT scanning and gamma-ray transmission imaging identified many blowholes in the interior of the body and the use of a chaplet on the side of one shell. The side of the body proved to be relatively thinner than the top and bottom. The traces of a hole for pouring molten metal into the center of the bottom indicates that molten metal was indeed emptied into the inverted body. In the metallographic analysis of two of the bodies and one lid, cementite and pearlite structures were identified on the body, indicating that it was made by casting. The presence of the ferrite structure with a partial distribution of the pearlite along with non-metallic inclusion in the lid suggested that the lid was made by forging.

Keywords : *Bigyeokjincheollae*, Computed Tomography, Gamma-ray Transmission Imaging, Metallographic Analysis

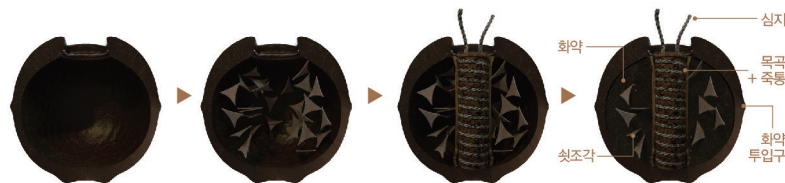
* Corresponding Author:
Kim Haesol

1. 서론

비격진천뢰는 조선시대 화약무기의 일종이며 최초의 시한폭탄으로 볼 수 있다. 1635년 이서가 쓴 『화포식언해』에 형태에 대한 기록이 있으며^[1], 1813년 박종경이 저술한 『용원필비』에는 구체적인 제원과 생김새가 도해로 남아있다^{[도1][2]}. 기록에 따르면 철로 된 구체 속에 폭발시간 조절장치와 화약·췌조각(빙철, 憑鐵)을 채워 넣은 형태로^[도2], 적진에 떨어진 후에 폭발하면 췌조각이 비산(飛散)하여 살상하는 무기이다. 임진왜란 당시 살상효과가 뛰어나고 명(明)과 왜(倭)가 모르는 무기였다는 기록^[3]이 남아있어, ‘비밀병기’, ‘귀신폭탄’ 등으로 불렸다^[4].



도1. 『용원필비』에 표현된 비격진천뢰 모습



도2. 비격진천뢰의 구조와 조립방법

하지만 비격진천뢰는 서울 창경궁에서 전해진 보물 제860호 등 전국적으로 5점만이 확인 되었을 뿐이었다. 그러던 2018년 전북 고창 무장현 관아와 읍성(사적 제346호, 이하 무장읍성)의 군기고(추정) 주변 에서 비격진천뢰 11점이 온전한 상태

로 발굴되었으며, 국립진주박물관은 임진왜란 전문 박물관으로 고창에서 출토된 비격진천뢰의 과학 조사 및 보존처리를 진행하였다.

보존처리는 2019년 국립진주박물관에서 진행한 특별전 ‘비격진천뢰 (07.16.~08.25.)’와 고창군 순회전(10.25.~12.22.) 전시를 위한 1차 보존처리를 우선 진행하였다. 이 과정에서 컴퓨터단층촬영(Computed Tomography, CT), 감마선(γ -ray)투과조사, 금속 조직 분석을 실시하였으며 비격진천뢰의 제작 과정을 상세히 밝혀낼 수 있었다. 본고에서는 2019년 7월까지 진행된 1차 보존처리 과정과 분석을 통해 확인한 제작기법에 대해 서술하고자 한다.

2. 보존처리 전 상태조사

2.1. 보존처리 전 사전준비

비격진천뢰는 2018년 8월부터 고창군·호남문화재연구원에서 진행한 고창 무장현 관아와 읍성 8차 발굴 과정에서 확인되었다⁽⁵³⁾. 무장읍성 동남부의 군기고로 추정되는 유구에서 발굴되었으며, 상층부 퇴적토의 제토 과정에서 5점이 발굴되었고, 수혈 내부에서 6점이 추가로 발견되었다. 수혈 내부의 6점은 삼각형 구도로 가지런히 위치해 있었다⁽⁵⁴⁾⁽⁵⁾.



도3. 무장현 관아와 읍성 전경



도4. 비격진천뢰 출토 상태

원형 물체의 정체를 확인하기 위해 한 점의 컴퓨터 단층촬영을 실시하였고, 이를 통해 미상의 물체가 조선시대 무기인 비격진천뢰임을 확인하였다.

국립진주박물관 이관 당시 비격진천뢰는 개별 상자에 담겨있었으며, 습도 변화를 막기 위해 랩으로 쌓인 상태였다⁽⁵⁵⁾. 11점의 비격진천뢰는 각각 20kg 내외로 일반적인 취급 방법으로 다루기에는 부피와 중량 면에서 위험요소가 많을 것으로 판단하였다. 따라서 별도의 작업 공간을 마련하였으며, 공간 전체를 금속유물을 보존·관리하기에 적당한 환경을 조성하였다⁽⁵⁶⁾. 또한 기존의 장비는 비격진천뢰의 크기와 무게를 감당할 수 없는 한계가 있었다. 때문에 보존처리를 위한 작업대를 비격

진천뢰의 무게를 안전하게 지지할 수 있는 작업대로 교체하고, 정밀분사가공기(Air Brasive) 또한 비격진천뢰의 크기와 무게를 감안하여 새로 제작하였다^(도7). 추가로 정밀분사가공기와 보존처리 작업대 모두 위아래로 움직일 수 있도록 설계하여 중량 유물의 이동 과정을 줄이고 안전에 대한 위험요소를 최소화 하고자 하였다.

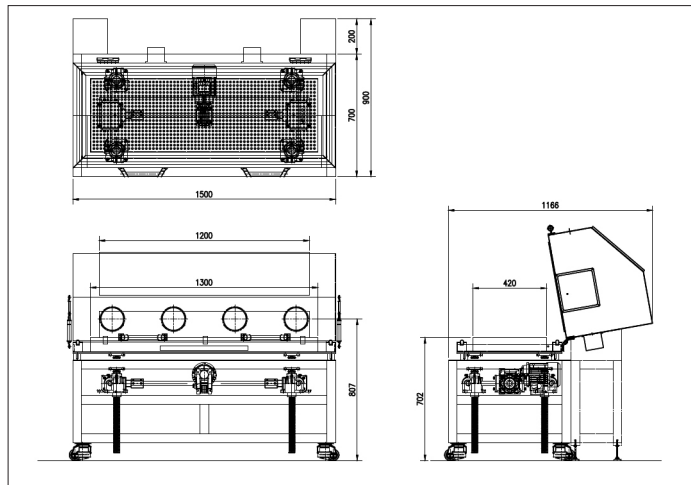


도5. 이관 당시의 비격진천뢰



도6. 비격진천뢰의 보관 환경

- a
b c
- (a) 상부
(b) 전면
(c) 측면



도7. 비격진천뢰의 무게와 크기를 고려해 설계한 정밀분사가공기 도면

인수 당시 비격진천뢰 6점(무장음성-1 ~ 무장음성-6)은 흙 등의 이물질로 뒤덮여 형태를 확인할 수 없는 상태였다. 호남문화재연구원에서 외부 이물질을 제거한 5점 또한 이물질과 부식산화물로 인해 뚜껑이 들어가는 자리의 명확한 형태 등을 알 수 없었다^(도8). 부식물 표면이 드러난 5점을 통해 지름이 17~19cm 가량이며 무게는 17~18kg으로 제원이 유사하다는 점만을 확인 할 수 있었다.



무장읍성 - 1



무장읍성 - 2



무장읍성 - 3



무장읍성 - 4



무장읍성 - 5



무장읍성 - 6



무장읍성 - 7



무장읍성 - 8



도8. 비격진천뢰의 보존처리 전 상태

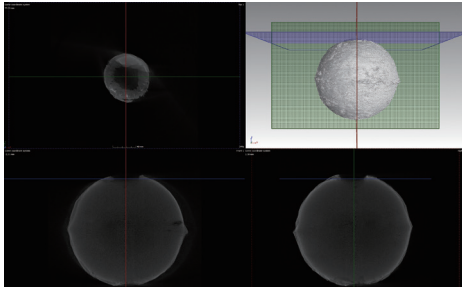
2.2. 내부구조 조사

비격진천뢰의 정확한 형태를 파악하고 부식상태 및 균열 등의 상태를 조사하기 위해 11점에 대한 컴퓨터단층촬영을 실시하였다. 컴퓨터단층촬영이란 X선을 여러 각도에서 피사체에 투영하고 이를 컴퓨터로 재구성하여 피사체 내부 단면의 모습을 화상으로 처리하는 기법이다. 종래의 X선 장치로는 얻을 수 없었던 피사체의 상태를 단층상으로 얻을 수 있게 되어 정확한 상태 파악에 도움이 되는 영상장치의 일종이다^[6].

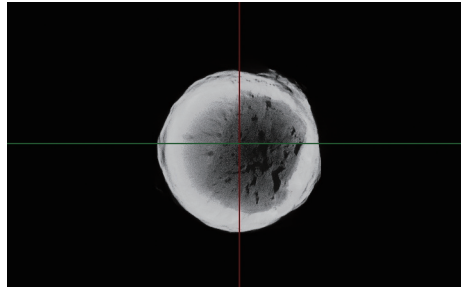
컴퓨터 단층촬영(CT Modular, YXLON, DEU)은 국립중앙박물관에서 진행하였으며, 이후 국립진주박물관에서 영상을 분석하였다. 컴퓨터단층촬영은 600kV, 1.15mA, 690W로 촬영하였으며, 초점 크기는 0.7mm 튜브를 사용하였다. 촬영한 데이터를 바탕으로 유물의 상태에 대한 분석을 실시하였다.

컴퓨터 단층촬영 영상 확인 결과 비격진천뢰의 표층으로부터 내부 1cm 이내의 깊이까지만 확인이 가능하였다^(도9). 원인은 비격진천뢰의 두께와 밀도가 높아 투과상을 만들어 내지 못했기 때문이다. 하지만 고착된 이물질의 두께가 2cm 가량이라는 것을 알 수 있었으며, 유물 표면에서 뚜껑이 들어가는 입구가 한 개 있는 것을 확인

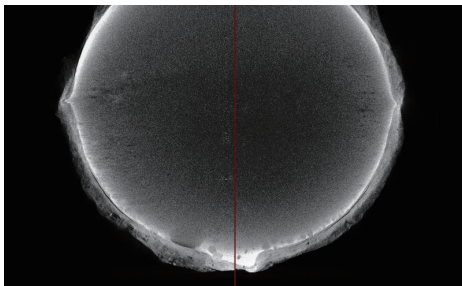
하였다^(도10). 뚜껑이 들어가는 입구의 크기는 긴 방향이 4cm, 짧은 방향이 2cm 가량이며, 입구의 반대방향인 저부는 살짝 융기되어 있는 것을 관찰했다^(도11). 이를 토대로 유물의 상하부를 확인하고 보존처리 과정에서 활용 할 수 있었으며, 측면에는 주조 분할선으로 보이는 흔적과 한 개의 화약투입구를 확인되었다^(도12).



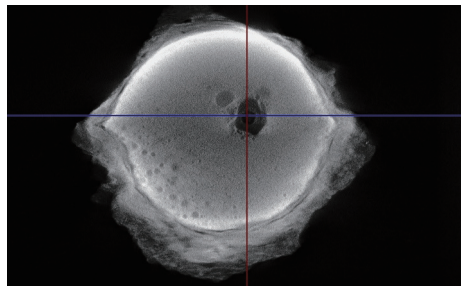
도9. 컴퓨터단층촬영 영상으로 본 비격진천뢰



도10. 컴퓨터단층촬영 영상으로 확인한 본체 입구의 형태



도11. 컴퓨터단층촬영 영상으로 확인한 주조분할선과 저부의 형태



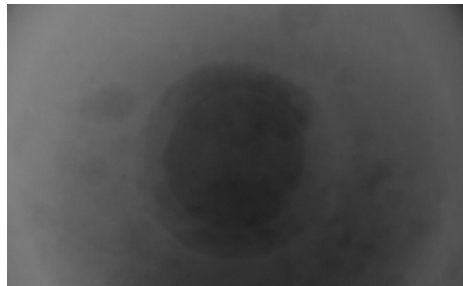
도12. 컴퓨터단층촬영 영상으로 확인한 외부 이물질 층의 두께와 화약투입구

컴퓨터 단층촬영을 통해 확인하지 못한 유물의 두께와 내부 상태·부속품의 장입(裝入) 여부를 확인하기 위해 감마선 투과조사를 추가로 실시하였다.

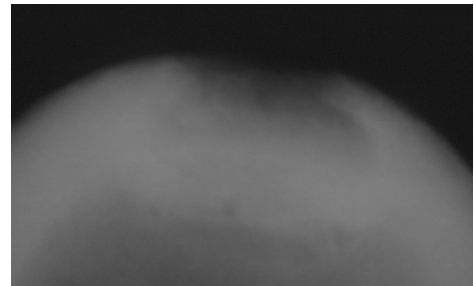
감마선은 방사선의 일종으로 매우 짧은 파장의 전자기파이다. 때문에 X선보다 높은 투과력을 가진다. X선을 사용한 컴퓨터단층촬영보다 강한 선원을 이용해 유물의 내부 상태를 확인하고자 하였다. 본 연구에서는 감마선의 선원으로 Co-60을 사용하였으며 울산광역시 국가산업단지에서 촬영하여 국립진주박물관에서 분석하였다.

감마선투과조사결과 본체 입구 부분의 형태를 보다 구체적으로 확인할 수 있었다. 컴퓨터단층촬영 영상에서 보였던 가장 바깥쪽 직사각형의 구멍 안쪽으로 원형의 홈이 있는 구조임을 확인했다^(도13,14). 또한 무장음성-10 비격진천뢰의 경우 측면상의 입구 부분에서 판형의 물질이 있는 것이 관찰되었다^(도15). 상방에서 촬영한 사진의

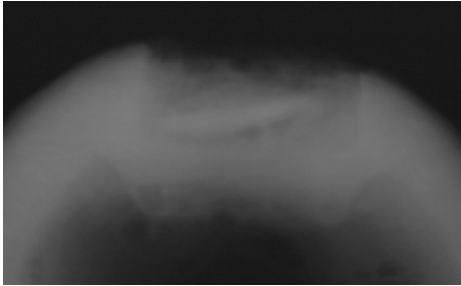
경우 투과되어 나타나지 않아 관형의 물질이 어느 정도 크기인지는 확인할 수 없으므로 보존처리 과정에서는 유의해야 함을 알 수 있었다. 무장읍성-6 비격진천뢰를 비롯한 일부 유물의 경우 상방에서 촬영한 사진의 내부 투과도가 일정하지 않은 것을 확인할 수 있었다^(도16). 이는 비격진천뢰 내부에 어떠한 이물질이 삽입되어 있으나 한쪽 방향에만 쏠려있어 투과도의 차이를 야기한 것으로 추정된다. 또한 유물의 기벽두께가 일정하지 않아 상대적으로 얇은 부분이 존재하고^(도17), 기공이 저부 방향으로 몰려있어^(도18) 상대적으로 파손 우려가 있는 부분을 유추할 수 있었다. 무장읍성-7의 측면상에서는 비격진천뢰의 본체와 분리되어 있으나 비슷한 투과도를 갖는 물체가 측면에 관찰되었다^(도19). 이는 형틀받침쇠로 주조시 내형틀과 외형틀의 간격을 유지하기 위해 사용된다. 형틀받침쇠가 있는 점과 주조분할선의 흔적, 저부방향의 용기된 특징과 기공이 저부방향으로 분포하는 점 등을 통해 비격진천뢰 본체가 주조로 제작되었으며 저부방향으로 주물을 주입하였음을 유추할 수 있었다. 또한 형틀받침쇠의 경우 창녕 화왕산성 비격진천뢰에서도 확인이 가능한 특징으로 고창 무장현 관아와 읍성 출토 비격진천뢰에서 3개의 형틀받침쇠를 사용하였을 것으로 보인다^[7]. 조사결과를 토대로 비격진천뢰의 제작 방법을 유추하면(도20)과 같다.



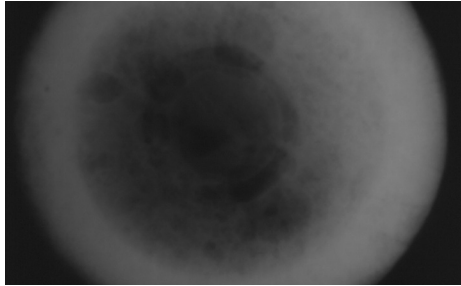
도13. 감마선투과조사를 통해 확인한 입구의 형태: 직사각형의 구멍 뒤로 원형의 띠처럼 홈이 관찰된다



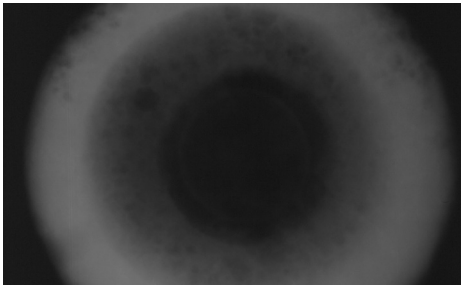
도14. 감마선투과조사를 통해 확인한 입구의 형태: 구멍 안쪽으로 홈이 관찰된다. <도13>과의 비교를 통해 원형의 홈인 것을 알 수 있다.



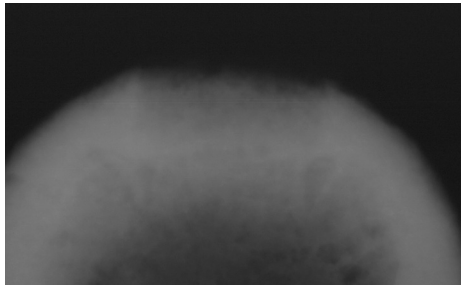
도15. 무장음성-10 비격진천뢰의 측면상: 뚜껑 구멍 안쪽으로 -자의 물체가 관찰된다.



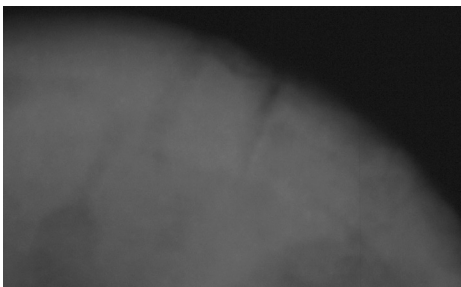
도16. 무장음성-6 비격진천뢰의 상면상: 내부가 반 측면만 투과가 덜 되었다. 내부에 어떤 이물질이 반만 차있는 것으로 유추할 수 있다.



도17. 무장음성-1 비격진천뢰의 상면상: 측면의 기벽 두께가 일정하지 않은 것이 확인된다.



도18. 무장음성-1 비격진천뢰의 측면상: 기공의 분포가 저부 방향에 몰려있는 것을 확인할 수 있다.



도19. 무장음성-7 비격진천뢰의 측면상: 형틀받침쇠가 있는 것이 관찰된다.



도20. 비격진천뢰 제작방법 모식도

3. 보존처리

3.1. 1차 보존처리

비격진천뢰의 보존처리는 처리 전 조사가 완료된 3월부터 2019 조선무기 특별전 ‘비격진천뢰’ 전시를 시작한 7월 까지, 약 4개월간의 1차 보존처리 과정을 거쳤다. 일반적인 금속(철제)유물의 보존처리 과정은 이물질 제거·탈염 처리·방청 및 강화처리·접합 및 보강의 과정을 거친다. 그러나 1차 보존처리의 경우 발굴품의 신속한 공개 차원에서 계획된 전시를 앞두고 있었기 때문에 표면의 부식 요인을 제거하는데 중점을 맞췄다. 흙으로 덮여있던 비격진천뢰의 외부 이물질과 표면의 부식 요인을 제거한 뒤 강화처리를 하여 전시가 가능하도록 하였다. 전시가 종료되는 시점부터 2차 보존처리를 시작했으며, 1차 보존처리과정에서 미완료된 이물질 제거를 진행하였다. 이물질 제거가 완료된 후에는 탈염처리·강화처리 등의 금속(철제)보존처리 과정을 거칠 예정이다.

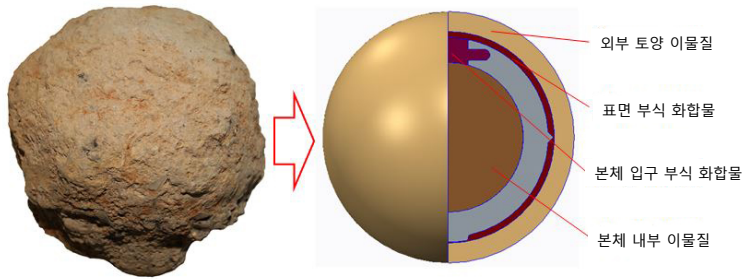
고창 무장현 관아와 읍성 출토 비격진천뢰의 경우 물리적 방법^[8]만을 이용하여 이물질을 제거하였다. 비격진천뢰의 바깥쪽은 발굴 현장의 퇴적으로 판단되는 점성이 없는 흙으로 덮여 있었으며, 유물 표면과 본체 입구방향에는 적갈색의 부식화합물이 관찰되었다^(도21-23).



도21. 비격진천뢰 외부 토양 이물질



도22. 비격진천뢰 표면 부식 화합물



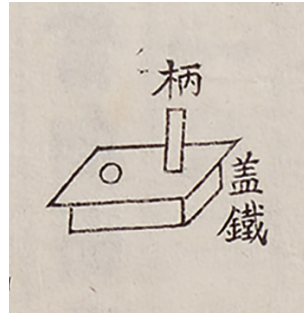
도23. 비격진천뢰 이물질 모식도

이물질제거는 메스와 망치 등의 소도구와 정밀분사가공기를 이용하여 진행하였다. 표면의 안정한 Magnetite층이 나타나기까지 반복 실시하였으며, 이 과정에서 (도15)에서 확인한 무장읍성-10의 一자형의 물체가 비격진천뢰 뚜껑임을 확인했다(도24). 입구 내부는 정밀분사가공기를 사용할 경우 유리가루의 제거가 어렵기 때문에 초음파 스케일러(Ultrasonic scaler)를 사용해 이물질을 제거하였다. 감마선투과조사를 통해 확인한 본체 입구 부분의 형태를 참고하여 이물질을 제거했으며, 무장읍성-10 비격진천뢰 뚜껑의 경우 소도구를 이용한 이물질 제거를 병행하였다. 그 결과 뚜껑의 형태가 『용원필비』에 기록된 형태(도25)와 다름 확인할 수 있었다. 또한 손잡이가 있었던 것으로 보이는 흔적과 심지 구멍 2개를 발견하였다(도26). 뚜껑의 크기는 본체 내부 홈의 폭과 일치하여 입구를 통해 안으로 넣고 내부 공간에서 돌려서 고정하도록 만들었음을 알 수 있었다. 이러한 고정 방식은 일본 나가사키현 마쓰우라시 다카시마 해저유적 출토 작열탄 철폐(てつほう)와 유사하다(도27,28)(9). 해당 토제 철폐는 13세기 여몽연합군이 사용한 것으로 추정되며 재질은 토제품으로 차이가 있다. 무장읍성 출토 비격진천뢰의 뚜껑과 『용원필비』의 기록·다카시마 해저 출토 철폐의 특징을 비교하면 표1과 같다. 문헌의 기록과 실제 유물의 형태가 다른 이유와 여몽연합군이 사용한 토제 철폐와 구조의 유사성을 갖는 이유 등은 향후 추가 연구가 필요할 것으로 보인다.

뚜껑은 본체와 부식 화합물로 고착되어 있어 분리하여 내부 장입물을 확인하고 보존처리하는 것은 파손의 우려가 있으므로 진행하지 않았다.



도24. 이물질 제거과정으로 드러난 비격진천뢰 뚜껑


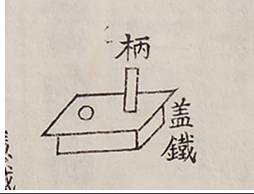
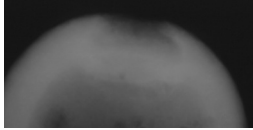
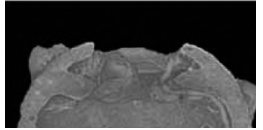


도25. 『용원필비』에 기록된 비격진천뢰 뚜껑의 형태



도26. 초음파 스케일러를 사용해 노출시킨 비격진천뢰 뚜껑

표 1. 비격진천뢰 뚜껑의 형태 비교

	무장읍성 출토 비격진천뢰	『응원필비』	다카시마 해저유적 출토 철폭
뚜껑 형태			-
본체 구조		-	

상술하였듯 전시를 위해 2차에 걸쳐 보존처리를 실시해야만 했기 때문에 전시 기간 동안 유물의 안전을 위한 강화처리를 선행하였다. 강화처리는 아크릴(Acrylic)계 강화제인 Paraloid B-72 3wt.%(in Xylene)를 사용해 표면을 코팅하였다. 일반적으로 탈염 처리 등의 부식 요인 제거가 마무리 된 후 실행하는 과정이지만, 전시 기간 동안 표면의 부식이 진행되는 것을 방지하고자 실시하였다. 강화제는 표면의 색상 변화에 유의하며 수회 도포하였다. 2차 보존처리 과정에서 강화제를 제거해야 하므로 본체 입구 내측에는 도포하지 않았다^(도29).





도29. 비격진천뢰의 보존처리 후 상태

추가적으로 전시환경 조성을 하는 데 있어서 습도를 조절하기 위해 제올라이트(Zeolite)를 활용하였다. 제올라이트는 알루미늄 규산염 광물의 일종으로 다량의 Al와 Si를 함유하고 있다. 이는 흡습을 하는 성질을 가지므로 주변 환경의 제습에 효과가 있다^[10]. 또한 백색의 광물이기 때문에 전시장에 이질감을 주지 않을 것으로 판단하여 비격진천뢰의 바닥재로 사용하였다^(도30).



도30. 제올라이트를 활용한 전시 연출

3.2. 금속 조직 분석

고창 무장현 관아와 읍성 출토 비격진천뢰의 금속학적 특성을 확인하기 위해 금속현미경(Metallurgical Microscope, Leica, DM2500D)으로 조직을 분석 하였다.

총 3점의 시편을 획득하여 분석하였으며, 본체 저부 2개와 보존처리 과정에서 발견한 뚜껑에서 1개의 시료를 채취하였다^(표2). 시료를 채취한 위치는 <도31>과 같으며, 무장읍성-10의 경우 철판(뚜껑)의 수직방향으로 단면을 획득하였다. 시료 채취 후 소지금속의 부식을 방지하기 위해 아크릴계 강화제로 별도의 코팅을 실시하였다.

표2. 조사 대상 시료 내용

연번	유물명	채취 위치	채취 수량
1	무장읍성-3	본체 저부	1
2	무장읍성-9	본체 저부	1
3	무장읍성-10	뚜껑	1

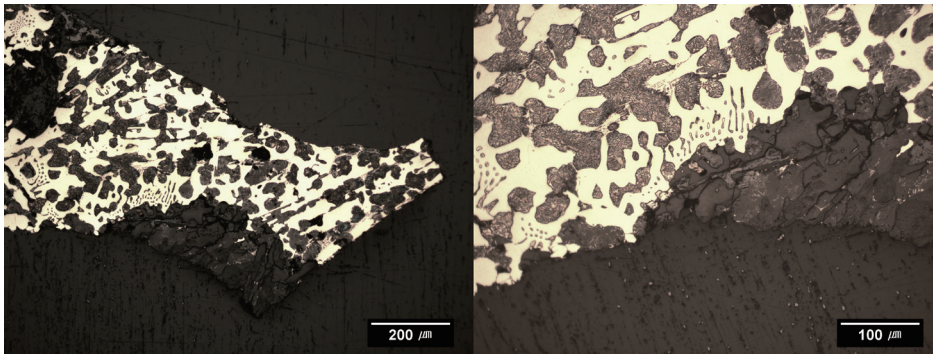


도31. 조사 대상 시료의 채취 지점

미세조직 분석을 위해 시료를 에폭시 수지로 마운팅 했으며, 120, 400, 800, 1200, 2000mesh의 순서로 연마한 후, 연마제(Diamond Suspension $6\mu\text{m}$, $3\mu\text{m}$, $1\mu\text{m}$)로 미세연마 하였다. 연마가 완료된 시료는 Nital(HNO_3 3% + Ethyl Alcohol 97%)로 수 초 Etching하였다.

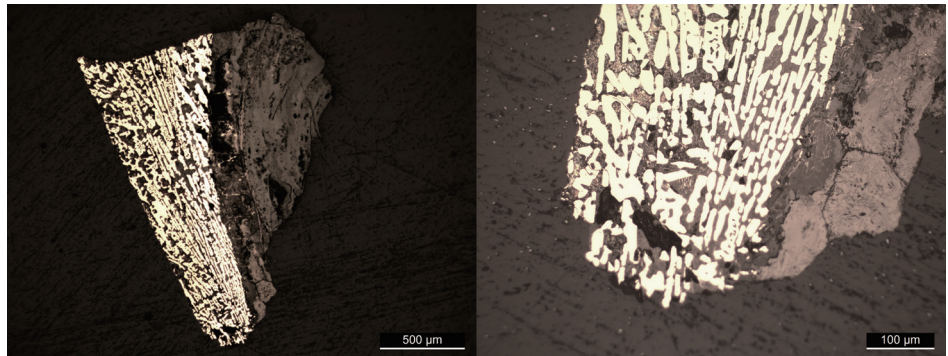
〈도32〉는 무장읍성-3의 본체 저부에서 채취한 시료의 금속현미경 이미지이다. 시멘타이트(cementite)조직과 펄라이트(pearlite)조직이 공존하는 것을 볼 수 있으며 부분적으로 흑연이 정출되어 있다. 따라서 탄소의 함량이 공정조성보다 많은 과공정백주철임을 알 수 있다.

이는 앞서 컴퓨터단층촬영과 감마선투과조사를 통해 확인한 내부 기공 · 형틀받침쇠 · 주조분할선 · 저부의 용기된 특징과 함께 본체가 주조로 제작되었음을 의미한다.



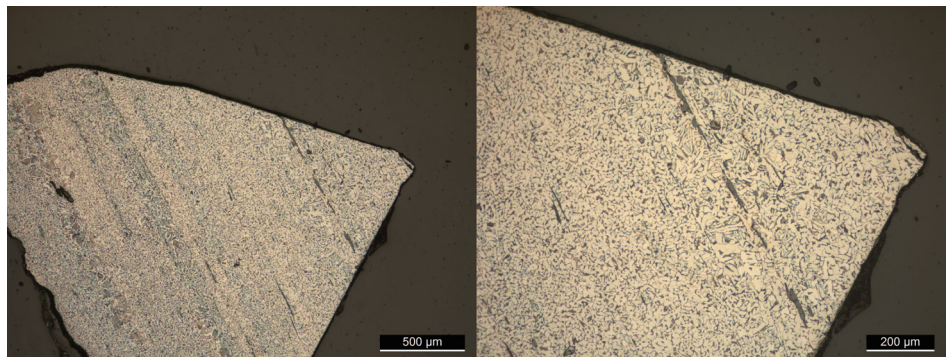
도32. 무장읍성-3의 광학현미경 이미지

〈도33〉은 무장읍성-9의 본체 저부에서 채취한 시료의 금속현미경상으로 무장읍성-3의 분석결과와 동일하게 시멘타이트조직과 펄라이트조직 · 정출된 흑연이 관찰되는 과공정백주철임을 확인하였다. 이를 통해 무장읍성-9 또한 주조로 제작되었음을 알 수 있다.



도33. 무장읍성-9의 광학현미경 이미지

반면 무장읍성-10에서 채취한 뚜껑에서는 페라이트(ferrite)조직이 주를 이루며 일부 펄라이트가 혼재되어있다^(도34). 또한 비금속 개재물이 일직선으로 연신되어 단조로 제작하였음을 확인하였다.



도34. 무장읍성-10의 광학현미경 이미지

4. 결론

2018년 고창 무장현 관아와 읍성 8차 발굴에서 출토된 비격진천뢰 11점은 보존처리와 조사, 전시를 위한 MOU 체결과 함께 2019년 1월 국립진주박물관에 이관되었다. 국립진주박물관은 비격진천뢰 특별전을 앞두고 2019년 1월부터 동년 7월까지 비격진천뢰 11점에 대한 처리 전 조사와 1차 보존처리를 실시하였다. 컴퓨터단층촬영과 감마선투과조사를 이용해 상태 조사를 실시하였으며, 이를 토대로 보존처리 계획을 수립하고 유물의 안전을 위한 각종 장치를 마련하였다.

보존처리는 전시를 기점으로 2차에 걸쳐 진행하며 1차 보존처리 과정에서는 이물질 제거와 표면 강화처리를 하였다. 이물질 제거 과정은 가장 바깥쪽의 토양 이물질과 유물 표면의 부식 화합물, 본체 입구 주변의 부식 화합물 등을 제거하였으며, 각

이물질의 특성과 유물의 상태를 고려하여 방법을 달리하였다. 가장 큰 성과는 이물질 제거 과정에서 최초로 비격진천뢰의 뚜껑을 발견하였다는 점으로, 뚜껑은 직사각형이며 꼭지와 심지를 빼내는 두 개의 구멍이 있는 형태로 『용원필비』에 묘사된 모습과 다름을 확인하였다. 또한 뚜껑의 크기는 본체 내부 홈의 폭과 일치하여 입구를 통해 안으로 넣고 내부 공간에서 돌려서 고정하도록 만들었음을 알 수 있었다. 이러한 고정방식은 일본에서 출토된 토제 철포와 유사하여 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

2019 조선무기 특별전 ‘비격진천뢰’ 전시를 위해 유물의 일시적인 강화처리를 실시하였으며, 이는 전시 후 제거하여 추가적인 보존처리를 진행할 수 있도록 조치하였다. 또한 전시환경의 습도조절을 위해 제올라이트를 활용하여 전시연출을 하였으며, 이는 제습효과가 탁월하여 고창군 순회전에도 동일 적용하였다.

또한 비격진천뢰의 제작기법을 파악하기 위해 컴퓨터 단층촬영과 감마선투과조사·금속조직분석을 실시하였다. 컴퓨터 단층촬영 결과, 내부에서 많은 기공이 관찰되었고 측면에 배치한 형틀받침쇠를 사용하여 벽의 두께를 조절하였으며 저부가 융기되어 있는 것이 확인되었다. 형틀받침쇠는 주조 시 외형틀과 내형틀 사이 지지를 위해 배치하기 때문에 이 형틀받침쇠를 이용해 벽의 두께를 조절할 수 있다. 측면 중앙에 위치한 형틀받침쇠는 다른 비격진천뢰에서도 나타나는데 일반적으로 3개를 배치하였고 정삼각형 구도에 가깝다. 비격진천뢰의 경우 형틀받침쇠를 배치한 측면 주변이 상대적으로 얇은 것을 알 수 있었다. 형틀받침쇠의 위치와 기공의 방향 저부의 돌출된 특징 등을 통해 저부를 탕구로 하여 주물을 주입하였음을 유추할 수 있었다. 또한 성분조직 분석을 통해 본체는 주조로 만들었고, 뚜껑은 단조로 만들었다는 것을 확인하였다. 본체는 잘 깨어지는 주조, 상대적으로 얇은 뚜껑은 보다 질기고 강한 단조기법으로 만들었다. 이것은 폭발할 때 뚜껑이 먼저 부서지는 것을 방지하고, 본체가 쪼개지면서 쇳조각이 사방으로 흩어지는 효과를 극대화하기 위한 의도를 반영한 것이다.

참고문헌

1. 『火砲式諺解』
2. 『戎垣必備』
3. 『宣祖修正實錄』 卷 26, 宣祖 25年 9月 1日 丁巳.
4. 『懲毖錄』
5. 노미선, *고창 무장현 관아와 읍성의 발굴성과*, p21, 고창 무장현 관아와 읍성 비격진천뢰(飛擊震天雷)의 발굴과 연구 학술 심포지엄, (2019).
6. 강동원, *컴퓨터단층영상학*, p15-20, 대학서림, (2015).
7. 허일권·김해슬, *고창 무장현 관아와 읍성 출토 비격진천뢰의 제작기법*, p61-62, 고창 무장현 관아와 읍성 비격진천뢰(飛擊震天雷)의 발굴과 연구 학술 심포지엄, (2019).
8. Museums, C. U. & Galleries Commission, *The Science For Conservators Series: Volume 2: Cleaning*, p27, (1992).
9. 長崎県松浦市教育委員会, *松浦市文化財調査報告書 第4集*, p289, 松浦市鷹島海底遺跡 総集編, (2011).
10. 김수진, *광물과학*, p549-551, 우성, (1996).